

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 34.01.02
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ
НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 17.03.2022 № 1

О присуждении Данилову Денису Васильевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Электрофизические и рекомбинационные свойства кремния, имплантированного кислородом»** по специальности 01.03.11 - физика полупроводников принята к защите «23» декабря 2021 г., протокол № 9, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Данилов Денис Васильевич, 1992 года рождения, в 2015 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ) по специальности «физика», получив квалификацию магистра. С 2015 по 2019 гг. соискатель проходил обучение в аспирантуре СПбГУ. В настоящее время соискатель занимает 2 должности: инженера «Междисциплинарного центра по направлению «Нанотехнологии»» Ресурсного парка СПбГУ и лаборанта лаборатории физики полупроводниковых приборов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», расположенном по адресу 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9.

Научный руководитель — **Вывенко Олег Федорович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники твердого тела ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Официальные оппоненты:

1. **Кведер Виталий Владимирович**, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Квантовых кристаллов» ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), дал положительный отзыв на диссертацию.

2. **Заморянская Мария Владимировна**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (г.н.с.) - заведующий лабораторией «Диффузия и дефектообразование в полупроводниках» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, дала положительный отзыв на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН)** в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, г.н.с. ФГБУН ИПТМ РАН Евгением Борисовичем Якимовым, утвержденном директором ФГБУН ИПТМ РАН доктором физико-математических наук Дмитрием Валентиновичем Рощупкиным, указала, что работа выполнена на высоком уровне, автором проведён большой объём исследований, результаты прошли апробацию на российских и международных конференциях и семинарах, а также опубликованы в международных изданиях.

В отзыве содержится 7 замечаний:

1. Прежде всего, следует отметить недостаточно четкую постановку задачи исследований, в частности, не отмечены достоинства и недостатки использованного метода повышения концентрации кислорода путём ионной имплантации по сравнению с обычно используемыми методами роста кислородных преципитатов при отжиге кремния, выращенного методом Чохральского.

2. Было бы полезно обсудить, относятся ли исследованные свойства протяженных дефектов к частному случаю ионной имплантации, при которой наряду с кислородом вводится много собственных точечных дефектов, или они имеют более общий характер.

3. Протяженные дефекты, а конкретно, преципитаты эффективно геттерируют примеси переходных металлов, что может существенно влиять на электрические свойства этих дефектов. В связи с этим, было бы важно знать примесный состав исследованных образцов.

4. Измеренные DLTS спектры уширены, как это обычно и наблюдается в случае протяженных дефектов. Однако в этом случае определение энергий активации из кривых Аррениуса не всегда корректно.

5. Было бы интересно провести детальное сравнение свойств сформированных в работе дефектов со свойствами кислородных преципитатов, полученных при отжиге кремния, выращенного методом Чохральского, тем более, что в работе используются схожие режимы термообработок.

6. В п.2 положений, выносимых на защиту, указано, что встроенный заряд «объясняется локализацией этого заряда в оболочках преципитатов, обладающих нестехиометрическим составом». По-видимому, правильнее было бы написать, что это объясняется в рамках предположения о локализации и т.д.

7. Следует сделать замечания и по оформлению работы. Так пропущена формула 2.21. Трудно найти определение χ_d . Литературный обзор охватывает слишком широкий круг вопросов, в том числе слабо связанных с тематикой диссертации, и в результате содержит некоторые спорные утверждения. В работе содержатся грамматические ошибки.

Указано, что сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, её теоретическая, практическая значимость, а также достоверность представленных результатов не вызывает сомнения.

Уровень работы соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» от 19.08.2019, утвержденного директором ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а соискатель, Данилова Денис Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.11 — физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их высокой квалификацией, широкой известностью, а также высоким уровнем компетентности в научной тематике, в которой выполнена работа.

На автореферат поступило 4 отзыва, все они положительные.

1. Отзыв доктора физико-математических наук **Карасева Платона Александровича**, профессора высшей инженерно-физической школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29). Отзыв положительный, содержит 3 замечания:

а) В автореферате не описана процедура ионной имплантации, использованная для получения исследуемых образцов. Расчетные профили распределения концентраций имплантированных атомов кислорода, приведённые на рис.1 (а, б) и рис. 7 имеют довольно сложную форму и отличаются друг от друга. Это позволяет предположить, что имплантация производилась в несколько этапов, последовательность которых может существенно влиять на формируемые радиационные повреждения структуры кремния и на дефекты, образуемые при отжигах.

б) Не очень четко описана процедура термообработки образцов. Например, на стр.13 автореферата упоминается «короткий 1000 °С гомогенизирующий отжиг», однако дальнейшая процедура многоступенчатого отжига не приведена.

в) В автореферате имеется ряд опечаток.

2. Отзыв доктора физико-математических наук **Зубкова Василия Ивановича**, профессора кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина) (197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф). Отзыв положительный, содержит 2 замечания:

а) При измерении ВАХ имплантированных образцов обнаружено увеличение напряжения открытия диода до 4 В при понижении температуры до 100 К. Из автореферата не достаточно ясно, как и какой барьер возникает в области имплантации, ограничивающий протекание прямого тока, и как это связано с изменением температуры.

б) Вставка к рисунку 2Б, очевидно, представлена на отдельном рисунке 3.

3. Отзыв кандидата физико-математических наук **Грязева Александра Сергеевича**, начальника лаборатории прочностного анализа отдела теплофизики ЯУ Отделения канальных реакторов Курчатовского комплекса атомной энергетики НИЦ «Курчатовский институт». Отзыв положительный, содержит 4 замечания:

а) В автореферате не указано, с помощью какого метода были рассчитаны профили распределения ионов кислорода в кремнии, представленные на рис. 1 (А) и (Б).

б) На стр. 9 отмечено, что «радиус кислородных преципитатов линейно растет с температурой отжига». Однако в автореферате данных об экспериментальном подтверждении данного суждения не приведено.

в) В автореферате автор делает оценки положительного заряда в области имплантации, исходя из анализа $C(V)$ характеристик при комнатной температуре. Почему для оценок была выбрана именно комнатная температура и исследовалось ли наличие глубоких уровней, лежащих вблизи середины запрещенной зоны, заряд которых не был учтён в приведённых оценках?

г) В автореферате не приведены расшифровки сокращений «ОР» и «ГД»: рис. 8 (А). Имеются опечатки по тексту, например на стр. 7 вместо 6 статей написана цифра «5»; в подписи к рис.1 на стр. 9: «при 700 °С 800 °С»; на стр. 10 в подписи к рис. 2 - лишнее предложение «На вставке к рисунку показана...».

4. Отзыв кандидата физико-математических наук **Терещенко Алексея Николаевича**, старшего научного сотрудника Лаборатории квантовых кристаллов, Ученого секретаря Федерального бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 2). Отзыв положительный, без замечаний.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получен ряд важных результатов для современной физики полупроводников:

1. Прямыми измерениями показано, что кислородные преципитаты, сформированные при отжигах при температурах свыше 800 °С кремния, имплантированного кислородом, обладают встроенным положительным зарядом. Установлено, что интегральная величина заряда кислородных преципитатов в области имплантации уменьшается с увеличением их среднего радиуса. На основании представленной модели автор делает выводы о локализации заряда на оболочках кислородных преципитатов.

2. Установлено, что в результате многостадийного отжига при температурах/длительностях 1000 °С /15 мин; 650 °С /7 час.; 800 °С /4 час.; 1000 °С /6 часов кремния, трехкратно имплантированного кислородом с энергиями/дозами 350 кэВ/ $1,5 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$; 225 кэВ/ $0,9 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$; 150 кэВ/ $0,7 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ соответственно, на глубине около 800 нм происходит формирование слоя кислородных преципитатов размером порядка 50 нм. Этот слой оказывается пространственно отделён от слоев других структурных дефектов, в результате чего автору удалось на одном образце выделить характерные для каждого из типов дефектов компоненты сигналов люминесценции и нестационарной спектроскопии глубоких уровней.

3. Обнаружено, что при получасовом 700 °С отжиге кремния, трехкратно имплантированного кислородом с энергиями/дозами 350 кэВ / $1,5 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$; 225 кэВ / $0,9 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$; 150 кэВ / $0,7 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ соответственно, на глубине около 800 нм образуется слой дефектов высокой плотности, проявляющих акцепторные свойства. На основании полученных экспериментальных результатов данные дефекты отнесены к линейным междуузельным дефектам (rod-like defects).

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость диссертационной работы Данилова Д.В. состоит в получении новых экспериментальных данных о электрофизических, рекомбинационных и структурных свойствах кислородных преципитатов в кремнии. Среди наиболее значимых с научной точки зрения результатов можно выделить представление модели локализации заряда кислородных преципитатов, а также объяснение необычного поведения релаксационного сигнала эмиссии электронов с акцепторных состояний внутри области пространственного заряда Шоттки-диода.

Практическая значимость работы состоит в возможном применении установленных свойств кислородных преципитатов в технологических процедурах кремниевой микроэлектроники. В частности, установленная зависимость плотности заряда области имплантации от среднего радиуса кислородных преципитатов позволяет производить оценки среднего радиуса преципитатов при известной концентрации кислорода в области имплантации.

Достоверность и надежность результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается внутренней согласованностью большого числа представленных экспериментальных данных, полученных различными исследовательскими методиками с использованием современного оборудования, а также схожестью свойств образцов, подверженных близким условиям термообработки. Представленные результаты не раз проходили апробацию на российских и международных конференциях, а также были представлены в периодических изданиях, входящих в международные базы данных.

Апробация работы.

Результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались на следующих конференциях:

- 1) «X Конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2014»», Иркутск, 2014.
- 2) «Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology XVI (GADEST 2015)», Bad Staffelstein, Germany, 2015.
- 3) «Gettering and Defect Engineering In Semiconductor Technology XVII (GADEST 2017)» Lopota resort, Kacheti, Georgia, 2017.
- 4) «Microscopy Conference (MC2017)», Lausanne, Switzerland, 2017.

5) «19th International Conference on Extended Defects in Semiconductors 2018 (EDS 2018)», Greece, Thessaloniki, 2018.

6) «XII Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, «Кремний-2018»», Черногоровка, 2018.

7) «Gettering and Defect Engineering In Semiconductor Technology XIX (GADEST 2019)», Zeuthen, Germany, 2019.

8) «XXI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике», Санкт-Петербург, 2019.

Личный вклад автора.

Вклад диссертанта состоит в подготовке контактов Шоттки для электрофизических исследований, тонких фольг поперечных срезов образцов для исследований просвечивающей электронной микроскопии, а также в проведении всех экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных данных, обсуждении и проверке теоретических моделей, а также в подготовке научных публикаций и участии в представлении результатов на конференциях и семинарах.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, **опубликовано 6 научных работ**. Все статьи опубликованы в реферируемых журналах, включенных в систему цитирования Web of Science и Scopus (в скобках указан личный вклад автора):

1. Danilov D. V., Vyvenko O. F., Sobolev N. A., Vdovin V. I., Loshachenko A. S., Shek E. I., Aruev P. N., Zabrodskiy V. V. Electrical Characterization and Defect-related Luminescence in Oxygen Implanted Silicon // Solid State Phenomena. - 2015. - Т. 242. - С. 368-373 (Получение, обработка результатов, подготовка статьи).

2. Соболев Н. А., Данилов Д. В., Александров О. В., Лошаченко А. С., Сахаров В. И., Серенков И. Т., Шек Е. И., Трапезникова И. Н. Образование донорных центров при отжиге кремниевых светоизлучающих структур, имплантированных ионами кислорода // Физика и техника полупроводников. - 2015. - Т. 49, № 3. - С. 406-408 (Получение и обработка результатов, участие в их обсуждении и подготовки статьи).

3. Danilov D., Vyvenko O., Loshachenko A., Ber B., Kasantsev D., Sobolev N. Luminescent and electrical properties of oxygen-implanted silicon // Phys. Status Solidi C. - 2017. - Т. 14, № 7. - С. 1700114 (Получение экспериментальных данных, их обработка и подготовка статьи).

4. Danilov D., Vyvenko O., Loshachenko A., Sobolev N. Peculiarity of Electric Properties of Oxygen-Implanted Silicon at Early Precipitation Stages // Phys. Status Solidi A. – 2019 - Т. 216, № 17. - С. 1900327 (Проведение эксперимента, обработка и анализ данных, подготовка статьи).

5. Danilov D., Vyvenko O., Trushin M., Loshachenko A., Sobolev N. Oxygen precipitate positive charge evolution upon annealing of oxygen-implanted silicon // J. Phys.: Conf. Ser. - 2019. - Т. 1190, № 012016. - С. 012016 (Получение, обработка и интерпретация результатов, подготовка статьи).

6. Danilov D. V., Vyvenko O. F., Loshachenko A. S., Sobolev N. A. Peculiarities of electron emission from high-density deep levels of nanodefects in oxygen-implanted silicon // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - Т. 1482, № 1. - С. 012003. (Планирование и проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка статьи).

Диссертация является полноценным законченным научным трудом, вносящим значительный вклад в понимание в процесс дефектообразования и свойств дефектов, образованных в кремнии при имплантации ионов кислорода и последующих высокотемпературных термообработках.

На заседании 17 марта 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Данилову Д.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.11 – «физика полупроводников».

При проведении голосования членов диссертационного совета в количестве 21 человек из 26 членов совета, из них 15 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Данилову Денису Васильевичу ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – . 21

Против – . 0

Воздержались – 0

Председатель диссертационного совета,
академик РАН, доктор физ.-мат. наук

Сурис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

Сорокин Лев Михайлович

17 марта 2022 г.